

中国古代壁画生物病害研究现状与展望

武发思^{1,4} 贺东鹏^{2,4} 苏敏¹ 田恬¹ 杨小菊^{2,4}
陈章^{2,4} 冯虎元¹ 汪万福^{1,4}

(1. 兰州大学细胞活动与逆境适应教育部重点实验室, 甘肃兰州, 730000; 2. 敦煌研究院国家古代壁画与土遗址保护工程技术研究中心, 甘肃敦煌, 736200; 3. 古代壁画保护国家文物局重点科研基地, 甘肃敦煌, 736200; 4. 甘肃省古代壁画与土遗址保护重点实验室, 甘肃敦煌, 736200)

摘要 生物体活动与代谢常造成古代壁画美学价值降低与结构损伤, 生物病害防治成为壁画保护修复中面临的一大难题。本文全面回顾了我国在壁画生物病害及其防治方面的研究进展, 对比了石窟寺、墓葬和博物馆等不同环境中壁画生物病害的类型特点, 阐释了优势病害生物危害壁画的作用机理, 分析了影响壁画生物病害发生和发展的主要因素, 归纳了相关的研究方法与分析技术, 并提出了该领域研究未来的问题与挑战。基于文献数据库调研, 概括出总体研究现状和发展趋势; 通过对本课题组在敦煌莫高窟、嘉峪关魏晋墓和曲阳北岳庙等处壁画生物病害研究案例的剖析, 总结了已取得的经验和存在的不足。总体而言, 对于微生物引起的壁画侵蚀关注度最高, 动物损害及防治次之, 温度、湿度、光照及大气污染物等环境因素和游客扰动等人为因素与壁画生物病害的关系正逐渐被重视; 然而针对病害微生物及蝙蝠、鸟类、昆虫等病害动物的防治依然是壁画保护中的棘手问题。受基础研究薄弱、应用技术缺乏、保护实践有限、相关标准规范缺位和专业人才不足等方面制约, 古代壁画生物病害监测和风险预警工作推进滞后。随着基因组学、代谢组学、蛋白质组学、生物信息学和仿生生物学等学科发展成熟, 在微观和分子水平上揭示壁画损坏的生物学机制已成为必然趋势; 研发便携式实时在线生物病害监测设备和构建新型综合防治技术体系刻不容缓。借助多学科手段、运用生态学思维、开展国际和区域科技合作以及全面推进“文化遗产保护生物学”学科建设是该领域未来发展的定位和方向。本文也为其他类型文物的生物病害研究与防治提供了参考和借鉴。

关键词 壁画保护 生物病害 防治对策 研究进展 监测预警

引 言

古代壁画是历史文化的重要载体, 具有稀缺性、脆弱性和不可再生性。其分布广泛, 类型多样, 具有极其丰富的艺术内涵和多元价值。在制作工艺、历史朝代演替、战争、宗教信仰或审美改变、自然环境变化等多重因素的共同作用下, 保留至今的壁画普遍存在着诸如空鼓、裂隙、坍塌、

酥碱、颜料层脱落及生物侵蚀损坏等多种类型的病害，威胁到其长久保存和展示利用。为此，壁画保护工作者长期以来不懈探索，查找病害成因，制定防治对策。本文正是以危害壁画保存的生物病害研究为出发点，全面回顾和总结了近30年来我国在古代壁画生物病害研究方面取得的成果，并提出了现阶段该领域研究中亟待解决的问题和未来的发展方向。

1 古代壁画及其生物病害概述

我国拥有大量种类多样形式各异的古代壁画资源，然而这些珍贵壁画病害普遍且复杂，其中生物病害是壁画保护中面临的突出问题之一。

1.1 古代壁画的分布及价值

古代壁画类型多样，广泛分布于世界各地，具有极其重要的历史价值、艺术价值和科学价值，其文化和社会价值方面的重要性也日益凸显。截至2018年7月，《世界遗产名录》收录的845项世界文化遗产（含文化景观遗产）中，因具有重要古代壁画而被列入的达32处之多，主要分布在欧洲、亚太地区、拉丁美洲和加勒比地区；按国别分布数量来看，意大利列入世界文化遗产的壁画类遗产数量最多（7处），俄罗斯和西班牙分别有3处，法国、希腊和中国分别有2处^[1]。

中国的古代壁画资源丰富，星罗棋布于石窟寺、庙宇、墓葬及博物馆馆藏环境中，其中最具代表性的敦煌莫高窟，以492个洞窟中的2000余身彩塑和45000m²壁画闻名于世，展示了延续千年的佛教艺术；1987年，联合国教育、科学及文化组织（UNESCO）世界遗产委员会根据世界文化遗产遴选标准认定其符合（i）~（vi）全部六条标准而入选《世界遗产名录》。

1.2 古代壁画保存面临的威胁

根据UNESCO统计世界文化遗产普遍面临的威胁因素，将其归纳为13大类：包括管理和机构因素、外来物种入侵或超级优势物种、突然的生态或地质事件、气候改变和极端天气事件、其他人类活动、遗产的社会或文化利用、当地环境影响的遗产物理结构改变、物质资源获取、生物资源利用和调整、污染、服务性基础设施、交通基础设施、建筑物和发展等。其中当地环境包括如微生物和害虫等生物病害，以及沙尘、太阳辐射和光照、相对湿度、温度、水分（包括降雨和地下水水位）、风的影响^[1]。正是在自然和人为等多重因素的共同作用下，古代壁画普遍存在着诸如空鼓、酥碱、颜料层脱落、色变及生物损害等多种类型的病害，威胁着古代壁画的长久保存和安全展示^[2]。

1.3 古代壁画的生物病害

20世纪初，已有地衣和植物体导致历史纪念碑生物退化的相关报道；而“生物退化”（或生物侵蚀、生物劣化）指由生物活动性导致非生命物质的性质发生不利于人类需求的变化，即非生命物质的内在价值受到削弱^[3]。微生物、动物和植物体均可对包括古代壁画在内的诸多文化遗产造成生物病害（图1），其中古代壁画的微生物病害指因微生物滋生对壁画产生的伤害，包括霉变、菌

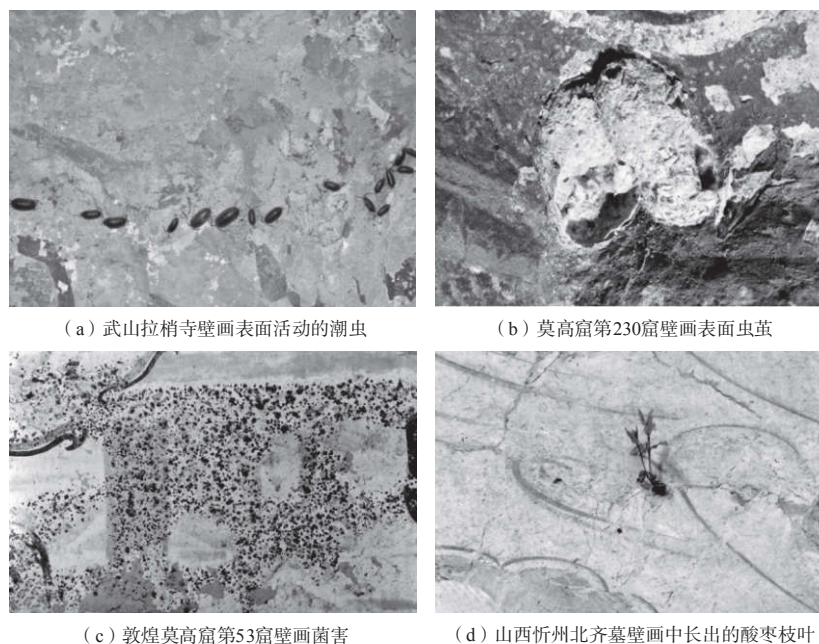


图1 古代壁画的生物病害

害等形式；动物病害主要指动物活动对壁画造成的各种破坏；植物病害指植物的根系、枝条对壁画结构造成的破坏^[2]。

2 研究现状与进展

根据当前该领域研究情况、壁画病害生物类别及保存环境差异，本文将依次分类展开述评，并讨论在壁画生物病害研究方面取得的最新进展。

2.1 文献发表

从文献计量学的角度来看，通过在Web of Science与PubMed数据库以关键词“Wall painting”和“Biodeterioration”检索1990~2018年发表在国际刊物上与壁画的生物退化与防治相关研究论文数量，共获得文献540余篇，总体来看国际上对壁画生物病害研究呈逐年增长趋势，这与文物保护意识的提高和研究经费的投入增加密切相关。而基于中国知网、维普和万方数据库，以“文物”和“生物”为关键词共检索到1990~2018年发表的相关文献380余篇，进一步筛选分析可知石质文物生物病害相关研究最多，木质文物、壁画类次之，与壁画生物病害相关文献40余篇。

在已有研究中，壁画的微生物病害关注度最高，动物病害次之，植物病害较少，其中微生物和动物病害的防治长期以来是文物保护工作者关注的焦点问题。整体而言，我国壁画生物病害及其防治研究的成果还较少，多数研究报告以生物本底水平基础调查为主，具有突出影响力的成果较少，研究的深度还有待加强。

2.2 研究方法

生命科学领域在动物学、植物学和微生物学研究中使用的方法有别，因此对于壁画生物病害的监测、检测和防治所采用的研究方法技术和措施具有很大差异。动物病害研究以野外调查的方法为主，主要关注病害动物类型、活动特点及其对遗址地文物的危害形式，其防治常借鉴农业和工业中控制害虫及鸟害的方法与措施。植物病害研究常采用样方调查、根系解剖鉴定及利用便携式探地雷达无损探测根径的大小及分布等。微生物病害研究方法多样，基于各类培养基的传统培养方法一直是研究微生物生理代谢和特性的主流方法，但自分子生物学技术出现以来，包括克隆文库构建、变性梯度凝胶电泳（DGGE）技术和分子测序等技术迅速发展并被应用于壁画微生物病害的调查和菌种鉴定中。

近年来，随着宏基因组学（metagenomics）、高通量测序（NGS）、原位荧光杂交（FISH）、qPCR和酶测定（enzyme assays）等新手段的快速发展，这些技术与传统培养法和16S/18S/ITS克隆文库法 etc 一起构成病害微生物群落特征和退化机理研究的“工具库”。与此同时，功能群分析及群落功能的预测已成为未来发展的趋势之一。依据文化遗产微生物监测和防治研究中已有报道，我们对主流研究思路和常见方法进行了总结（图2）。

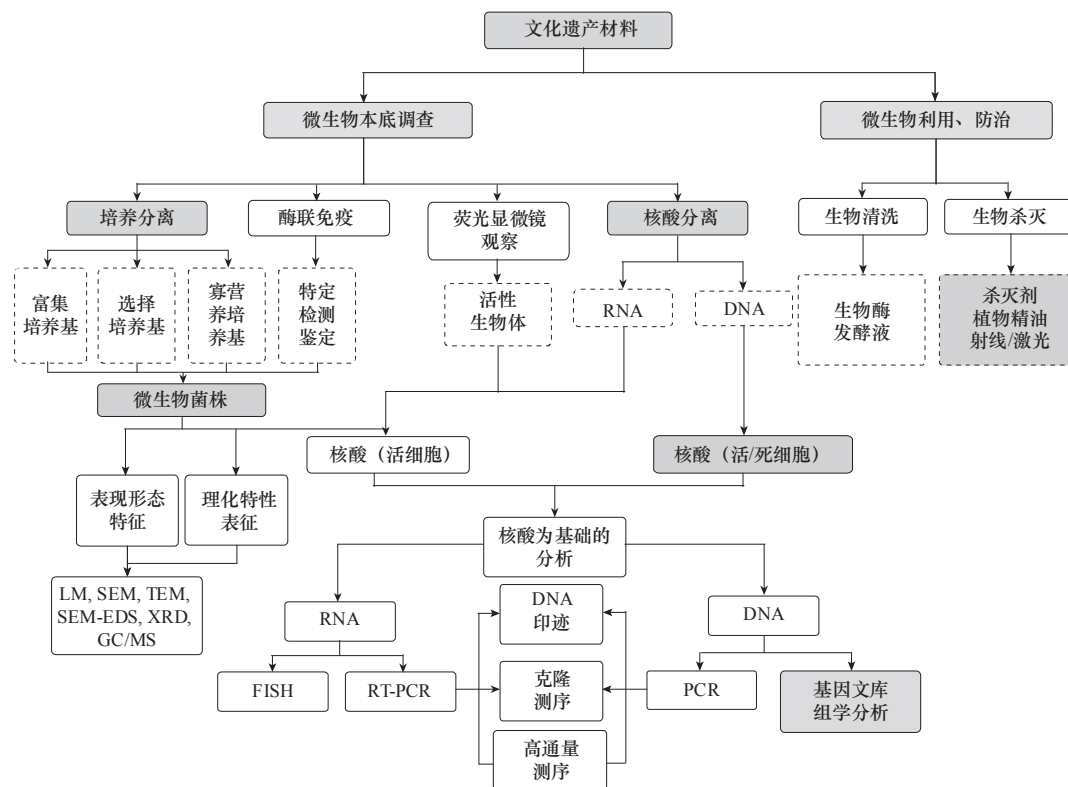


图2 文化遗产材料微生物病害研究技术路线

2.3 典型案例研究

我国在古代壁画及其赋存环境中生物病害的调查、分析和防治等方面已开展了较为全面的研究，以下以典型案例研究为主线，对研究现状和已取得的进展进行总结，其中重点介绍本课题组近年来开展的相关工作。

2.3.1 赋存环境空气微生物

现阶段，文物保护的内涵已延伸到对于文物及其赋存环境的保护，而壁画赋存环境的改变与病害发生的关系密切。例如，在壁画支撑体和地仗层中的水分活动以及壁画赋存环境高湿度的共同作用下，壁画盐害和菌害的发生率将大大升高，而环境空气中微生物孢子的传播和沉降则被认为与壁画微生物病害的发生存在关联。

本课题组通过对莫高窟三种开放类型和外部环境中空气微生物浓度的逐月监测发现，开放和完全不开放洞窟空气中的可培养细菌数量高于调节性开放和窟外环境；空气中大多数细菌及携带细菌的粒径在2~6 μm 之间，部分大于8 μm ；莫高窟空气中细菌的分布受到空气温度、相对湿度、风速和风向等环境因子的影响；空气中真菌数量在不开放洞窟和窟外数量较多，空气真菌的分布和群落组成与采样时间和地点具有显著的相关性；温度、相对湿度和游客活动是影响空气中微生物浓度和群落组成的主要因子^[4, 5]。

莫高窟空气中的优势细菌属依次为詹森菌属（14.91%）、假单胞菌属（13.40%）、芽孢杆菌属（11.25%）、鞘胺醇单孢菌属（11.21%）、微球菌属（10.31%）、微杆菌属（6.92%），柄杆菌属（6.31%）、玫瑰单孢菌属（5.85%）；窟区环境中共鉴定得到空气真菌11属17种，主要为枝孢霉属、镰刀霉属、链格孢属、曲霉属和青霉属；空气微生物群落组成和结构特征受时空分布和游客数量等因素影响^[4-9]。

如何控制壁画赋存环境空气质量，以及减小因井喷式游客数量增长造成的壁画赋存环境扰动是壁画预防性保护面临的难题之一。通过长期监测和评估不同开放模式下石窟内空气微生物浓度和类群变化，也可为遗产地游客承载力研究和旅游开放管理提供数据支撑和科学依据。

2.3.2 石窟寺壁画微生物

自20世纪90年代以来，我国在石窟寺壁画微生物研究方面已开展了许多工作。传统的分离培养技术在壁画微生物种类鉴定中被普遍应用，是由于其在病害菌株生理特性研究方面具有明显优势。然而，目前大部分微生物仍无法通过培养获得，外源营养的介入使得基于培养的方法无法准确揭示如壁画这类寡营养介质中微生物群落的真实信息。近年来，微生物群落特征的分子检测技术因其敏感性和准确性而广受微生物学家和文物保护工作者青睐，其可在短期内得到文物病害微生物群落组成和结构方面的重要信息。

对于石窟寺壁画微生物的关注兴起于壁画矿物颜料铅丹色变的研究。马清林等提出，壁画地仗层中的纤维类和颜料层中的胶结材料给异养微生物的生长繁殖提供了营养源，微生物在壁画的褪变色、酥碱粉化过程中可能发挥了重要作用^[10]。冯清平等从敦煌变色颜料中分离获得了6个属的细菌，优势菌为芽孢杆菌属和产碱菌属；霉菌5个属，优势菌为青霉属^[11]；利用分离菌株的模拟

试验证明枝孢霉、黑曲霉和两种特殊细菌对壁画红色颜料变色和胶结材料的老化均起到重要作用；微生物通过产色素污染壁画、代谢形成的草酸盐引起颜料晶形和铅丹价态的改变和变色^[12]；分离获得的枝孢霉在温度20℃、相对湿度60%或温度30℃、相对湿度50%就可在模拟壁画表面萌发，骨胶能对铅丹起到保护作用，但枝孢霉可分解骨胶，造成颜料稳定性下降，并通过产酸促进了铅丹向铅白的转变^[13, 14]；而黄杆菌属细菌的模拟实验发现，该菌体在加有铅丹的培养基上呈棕黑色，鉴定发现其可将铅丹氧化成PbO₂，在pH 9.8、37℃、黑暗条件下氧化程度最高，该氧化过程受质粒控制，并且菌体具有主动吸收铅的能力，扫描电子显微镜确定铅主要位于原生质体内^[15]。这些工作为我国壁画微生物研究奠定了重要基础。

近年来，本课题组围绕石窟寺壁画微生物类群的分子鉴定、群落特征、微生物与壁画颜料色变间的关系以及壁画菌害的成因和防治等方面开展了诸多工作：如对敦煌莫高窟壁画微生物多样性的研究^[16, 17]；通过克隆文库技术对莫高窟不同历史时期壁画微生物群落特征的研究，从时空尺度上揭示微生物群落的分布特点^[18]；利用Illumina MiSeq高通量测序技术确定假诺卡氏菌属和红色杆菌属为优势属，两者作为指示微生物，表明麦积山石窟壁画及彩塑正遭受着缓慢的微生物侵蚀^[19]；对武威天梯山石窟第18窟壁画微生物分析发现，主要隶属于细菌18门、158科、296属，芽孢杆菌属、乳球菌属、假单胞菌属和链球菌属为最优细菌属，真菌12门、45科、39属，其中酵母目为最优真菌。对于壁画病害指示微生物假诺卡氏菌特性及其对岩画及壁画的危害，近年也有过相关总结和讨论^[20]。

在美学价值破坏方面，微生物通过代谢胞外酶、色素和酸性产物等在壁画上沉积，导致壁画褪色或变色（如铅丹）。而在结构性损害方面，微生物可通过降解壁画中胶结材料和有机颜料、菌丝体生长，导致其起甲，降低结构稳定性。随着壁画微生物生态学研究的持续推进，微生物在壁画退化过程中扮演的角色将会更加清晰。

2.3.3 墓葬壁画微生物

自20世纪90年代开始，我国研究人员使用基于培养的手段对甘肃酒泉丁家闸十六国墓壁画和嘉峪关新城魏晋墓壁画^[21]、河南密县汉墓壁画^[22, 23]、陕西长安唐墓壁画^[24]、西安曲江翠竹园西汉墓壁画^[25]等几处墓葬壁画病害微生物进行了分离和鉴定；利用分子生物学技术研究微生物的报道有对我国北方5世纪墓室壁画^[26]、嘉峪关魏晋墓砖壁画^[17, 27]及唐韩休墓考古发掘现场壁画表面霉变病害菌群特征的分析^[28]；本课题组研究发现假诺卡氏菌属与曲霉属在嘉峪关壁画墓中占优势，墓室开放可能改变了壁画微生物群落结构^[17, 27]。对北齐徐显秀墓壁画菌害及成因分析显示，白色侧齿霉属导致壁画霉变，长期高湿度是其诱因（图3）；并在该墓葬中获得一株新细菌种^[29, 30]；近期，马文霞等对敦煌汉墓和魏晋墓酥碱砖壁画中可培养真菌类群及其耐盐性进行了分析^[31]，该研究为微生物活动导致壁画产生其他类型病害提供了新证据。

墓室环境通常密闭潮湿，高湿度及空气循环不畅成为墓室壁画菌害的主要环境成因。外源性有机质的引入及游客参观等因素应加以有效控制，以避免破坏墓室脆弱微生境的相对平衡。

2.3.4 馆藏壁画微生物

我国现有馆藏壁画绝大多数是从石窟寺或墓葬壁画揭取而来，主要因考古现场保存条件和技术有限，或因建设需要等其他原因所致。张艳杰等采用现代分子生物学技术，对造成会宁丁沟康湾墓画像

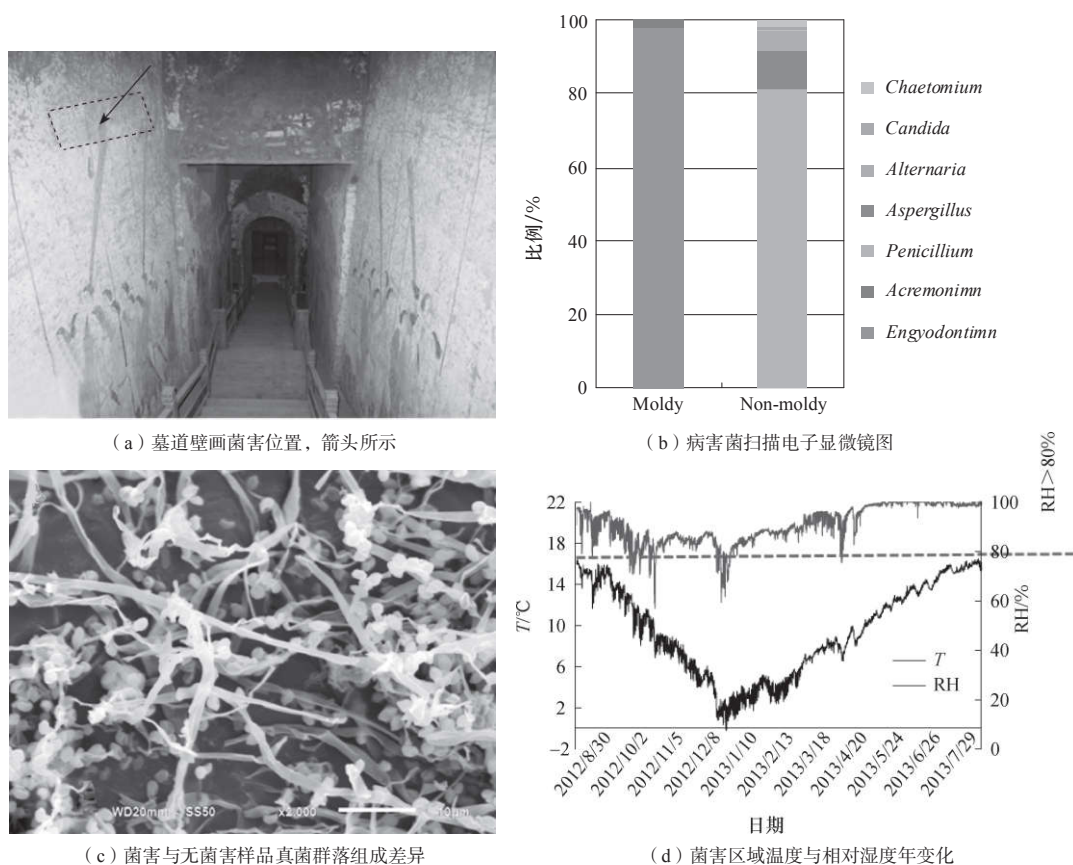


图3 北齐徐显秀墓壁画菌害及环境成因^[29]

砖腐蚀的真菌类群进行分离和鉴定, 所获得的真菌序列主要隶属于曲霉属和交链孢霉属^[32], 并得出由于壁画墓画像砖被多次搬迁, 常受人为扰动, 画像砖的真菌多样性下降, 其群落结构也发生变化。

本课题组利用高通量测序技术从天梯山石窟馆藏壁画分析确定细菌22门、239科、518属, 以原小单孢菌属和动性杆菌属为最优势菌属; 真菌17门、57科、51属, 以粪壳菌目和发菌科为最优真菌类群。原小单孢菌属、动性杆菌属等细菌和粪壳目、发菌科等真菌, 具有很强的有机物降解能力, 能利用壁画制作材料中的有机成分, 其大量存在可能会加速壁画的劣化; 因黄羊水库修建, 20世纪60年代揭取搬迁时, 部分人为干预措施, 包括鹿皮胶、生石膏的大量使用, 运输壁画的木箱包装过于严实; 搬迁后的管理缺位, 以及搬迁后壁画长期保存环境不良等因素, 是造成揭取壁画霉变的主要原因^[33]。

因此, 保持博物馆壁画保存环境中温度、相对湿度的相对恒定至关重要, 尚未进行保护和展示而储藏在文物库房中的壁画须加强病害日常巡查和管理。

2.3.5 壁画菌害防治

壁画微生物病害防治的传统方法包括紫外线或激光杀灭清洗技术、化学抑菌剂防治方法以及环境控制等; 近年来纳米Ag₂O、ZnO、TiO₂等抗菌新材料运用兴起, 植物精油等天然抑菌产物广受青

睐。然而在制定防治措施时,前期菌害调查分析必不可少,并深入剖析菌害成因和侵蚀机理。杀菌剂的使用应加以严格控制,以避免抗性菌株的形成,在非应急或抢救性防护条件下,减少生物杀灭剂的使用,进行保存环境及水源控制是当前主要趋势。

张昺林通过抑制剂对霉菌生长的影响试验,确定氯化汞和三丁基氧化锡的抑菌效果非常明显,基于色度影响评估确定,三丁基氧化锡、山梨酸钾、脱氢乙酸钠、苯扎溴铵、氯化汞、富马酸二甲酯的影响依次降低,建议氯化汞为壁画抑菌剂^[34]。而基于病害菌的筛选发现,0.2%~0.5%双氯酚对北齐徐显秀墓壁画菌害的抢救性防治最为有效^[35],其在现场应用中取得了较好的杀菌效果。然而,如果从环境控制方面可以解决菌害问题,其必然符合目前绿色环保和生态保护等方面的倡议。

2.3.6 动物病害类型、机理及防治

病害动物活动长期以来困扰着壁画及馆藏文物的保护,其中昆虫类病害最为严重。对于文物病害动物研究主要集中在害虫调查及防治研究、动物活动造成的损伤机理、排泄物污染及腐蚀影响壁画美学价值评价等几个方面^[36-41]。

本课题组在石窟寺壁画虫害研究方面已开展了大量工作;通过对包括敦煌莫高窟、西千佛洞、瓜州榆林窟、东千佛洞、张掖马蹄寺、永靖炳灵寺和天水麦积山等甘肃境内12处石窟寺中112个典型洞窟中活动的动物的调查和分析,确定了引起石窟寺病害主要动物类群及分布特征,明确了优势病害昆虫对石窟寺壁画的危害特点^[42, 43];通过傅里叶变换红外光谱分析仪(FIR)等分析了昆虫排泄物成分组成特点,结合剖面分析确定了昆虫排泄物与壁画的结合状态,并监测其对壁画的污染程度和速度,揭示了病害昆虫及排泄物对壁画的损坏机理^[37];通过设计模拟洞窟,并结合真实洞窟环境,研究了壁画病害昆虫仿爱夜蛾在模拟洞窟内的分布特征、迁移规律及其颜料趋性;将仿生学研究中的新技术运用到文物保护中,研发了一种高速图像与力数据同步采集系统来记录仿爱夜蛾在壁画表面的步态信息,确定其在壁画表面的运动步态和行为特征,进一步揭示了其对壁画的危害机理^[44-48]。

其他类型动物,如鸟类和蝙蝠的防治也是石窟寺和古建保护中涉及的重要方面。利用物理防治,如纱网、防鸟刺、黑光灯和超声波等依然是鸽子和蝙蝠等有害动物防治中的重要措施^[49, 50]。近年来,本课题组基于国际上倡导的综合害虫防治体系(IPM),构建形成了集定期监测跟踪和综合防治于一体的“敦煌莫高窟病害生物综合监测预警管理系统”,取得了较好的效果(图4),今后将在其他遗址地推广应用。

2.3.7 壁画植物病害及防治

截至目前,壁画的植物病害主要出现如墓葬和地宫等地下遗址环境中。也有石窟寺因灌木或乔木的生长形成的“根劈作用”而面临威胁。敦煌莫高窟壁画的植物病害仅出现在少数几个洞窟中,这些洞窟在历史时期积沙严重,以至于植物根系沿着流沙生长进入壁画,造成破坏,但目前这些植物根系已干枯,为非活动性植物病害。

遗产地植物与遗产保护的关系是一个非常值得深入探究的领域^[51]。为了判定莫高窟窟区周边大型乔木白杨根系大小、分布及其对石窟寺可能的影响,本课题组近年采用便携式探地雷达技术进行了一些探索性研究,为遗产地植物根系危害的无损评估提供了借鉴^[52]。

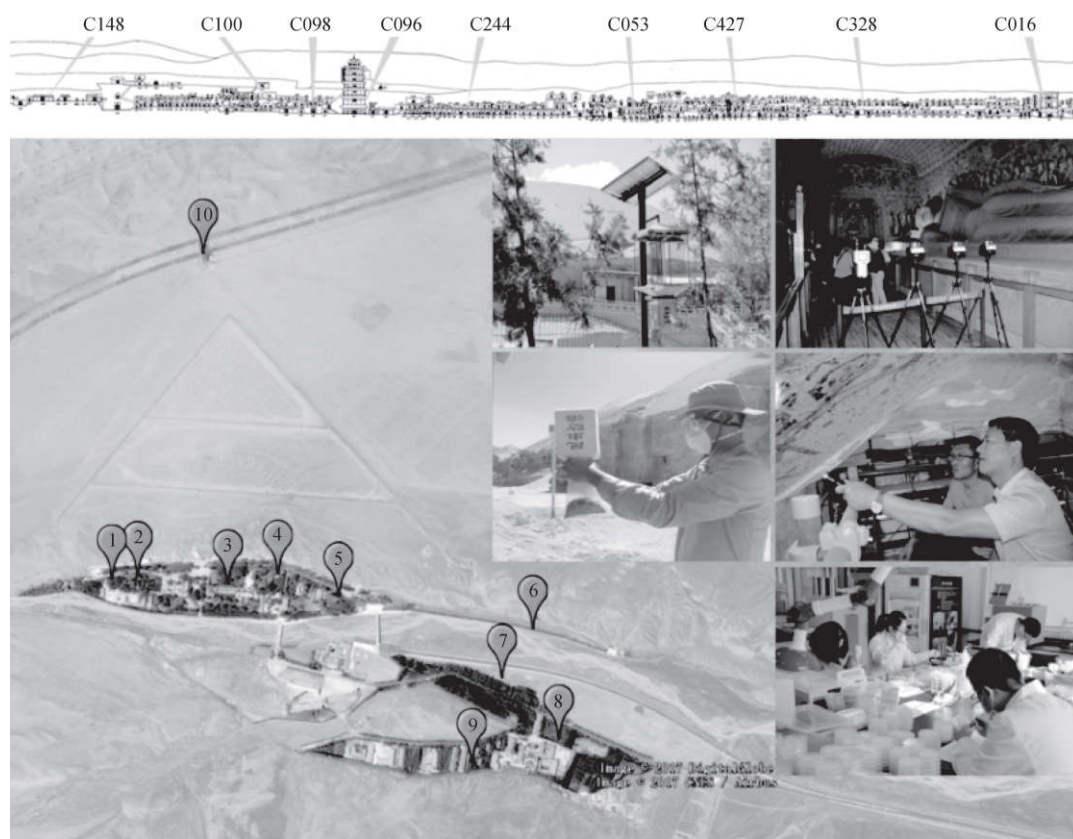


图4 敦煌莫高窟病害生物综合监测预警管理系统

3 问题与展望

长期以来,国内外对于壁画生物病害尤其是微生物病害方面已有大量的研究,但是鉴于病害生物本身的独立性以及壁画保存环境各自的特殊性,尽管在研究方法上不同学者已趋于一致,但是所获结果的对比性和相互借鉴性依然不强,导致在病害生物防治方面保护工作中很少有可完全套用的成熟方法和技术体系。

近年来新出现的壁画保存环境中游客人数激增等问题,导致旅游旺季石窟寺应急开放窟及小型洞窟扰动后面临的空气微生物浓度升高及壁画菌害风险增大,但是文化遗产保护中空气微生物检测及阈值相关的规范标准仍然缺失。同时,蝙蝠、鸟害及虫害防治仍是一大难题亟待解决。“水”是文物病害之源已成为普遍共识,但是如何有效地防治水患依然任重而道远。

壁画病害生物及其防治研究当前已进入了一个全新的阶段^[53],核心功能群分析和网络关联分析等技术日新月异,这与计算机科学、生物信息学、分析科学等学科领域技术的飞速发展密不可分。进一步加强多学科交叉研究,运用生态学思维,开展更多国际和区域科技合作以及全面推进“文化遗产保护生物学”学科建设(图5),以全方位推进生物退化及其防治方面研究工作,这将有助于提高我国乃至世界文化遗产的科学保护水平。

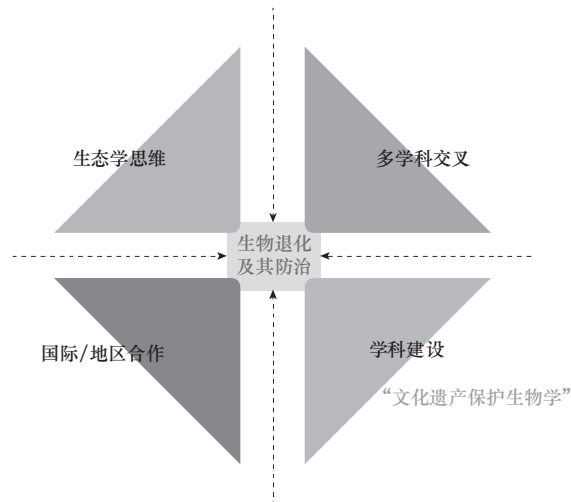


图5 文化遗产的生物退化及其防治研究展望

致谢：本研究受国家自然科学基金（31500430、31560160）、中国科学院“西部之光”人才培养引进计划、甘肃省科技计划项目（18JR3RA004、1604WKCA003）、甘肃省文物局课题（GWJ2014003）和山西省文物局课题（2014-kb-04）资助。

参考文献

- [1] 世界遗产中心 [EB/OL]. <http://whc.unesco.org/>.
- [2] 古代壁画病害与图示 (GB/T 30237—2013) [S].
- [3] Hueck H J. Biodeterioration of textiles and its prevention [J]. *Studies in Conservation*, 1965, 9 (Supp 1): 94-104.
- [4] Wang W, Ma X, Ma Y, et al. Seasonal dynamics of airborne fungi in different caves of the Mogao Grottoes, Dunhuang, China [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2010, 64 (6): 461-466.
- [5] Wang W, Ma Y, Ma X, et al. Seasonal variations of airborne bacteria in the Mogao Grottoes, Dunhuang, China [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2010, 64 (4): 309-315.
- [6] Wang W, Ma Y, Ma X, et al. Diversity and seasonal dynamics of airborne bacteria in the Mogao Grottoes, Dunhuang, China [J]. *Aerobiologia*, 2012, 28 (1): 27-38.
- [7] Wang W, Ma X, Ma Y, et al. Molecular characterization of airborne fungi in caves of the Mogao Grottoes, Dunhuang, China [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2011, 65 (5): 726-731.
- [8] 马旭, 汪万福, 马燕天, 等. 敦煌莫高窟第16窟空气微生物动态变化研究 [J]. *敦煌研究*, 2010, (5): 113-118.
- [9] 马燕天, 汪万福, 马旭, 等. 敦煌莫高窟洞窟内外空气中微生物的对比研究 [J]. *文物保护与考古科学*, 2011, 23 (1): 13-18.
- [10] 马清林, 胡之德, 李最雄. 微生物对壁画颜料的腐蚀与危害 [J]. *敦煌研究*, 1996, (3): 136-144.
- [11] 冯清平, 马晓军, 张晓君, 等. 敦煌壁画色变中微生物因素的研究——I. 色变壁画的微生物类群及优势菌的检测 [J]. *微生物学报*, 1998, 38 (1): 52-56.
- [12] 冯清平, 马晓军, 马清林, 等. 敦煌壁画色变中微生物因素的研究——II. 微生物对模拟石窟壁画颜料的影响 [J]. *微生物学报*, 1998, 38 (2): 131-136.
- [13] 冯清平, 张晓君, 马晓军, 等. 敦煌壁画色变中微生物因素的研究——III. 枝孢霉在石窟壁画铅丹变色中的作用 [J].

- 微生物学报, 1998, 38(5): 365-370.
- [14] 张晓君, 冯清平. 枝孢霉在敦煌壁画颜料变色过程中的作用[J]. 应用与环境生物学报, 1998, 4(3): 277-280.
- [15] 冯清平, 杨玲, 张晓君, 等. 使敦煌壁画红色铅丹变色菌株生理特性的研究[J]. 微生物学报, 1998, 38(6): 454-460.
- [16] 张景林, 唐德平, 张楠, 等. 敦煌莫高窟中细菌多样性的研究[J]. 微生物学通报, 2012, 39(5): 614-623.
- [17] 武发思, 汪万福, 贺东鹏, 等. 嘉峪关魏晋墓腐蚀壁画真菌群落组成分析[J]. 敦煌研究, 2013, (1): 60-66.
- [18] Ma Y, Zhang H, Du Y, et al. The community distribution of bacteria and fungi on ancient wall paintings of the Mogao Grottoes [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 7752.
- [19] Duan Y, Wu F, Wang W, et al. The microbial community characteristics of ancient painted sculptures in Maijishan Grottoes, China [J]. Plos One, 2017, 12(7): e0179718.
- [20] 潘晓轩, 葛琴雅, 潘皎. 假诺卡氏菌属 (*Pseudonocardia*) 微生物对壁画和岩画类文物的危害[J]. 微生物学报, 2015, 55(7): 813-818.
- [21] 郑国钰, 马清林. 甘肃酒泉、嘉峪关壁画霉菌菌分离鉴定与防治研究[J]. 文物保护与考古科学, 1996, 8(1): 43-50.
- [22] 陈红歌, 贾新成. 密县汉墓壁画霉菌的分离鉴定[J]. 敦煌研究, 1996, (3): 145-148.
- [23] 张慧, 敬言, 晁开, 等. 墓葬壁画霉菌的分离与鉴定[J]. 甘肃科学学报, 1998, 10(2): 60-64.
- [24] 郭爱莲, 单隼, 杨文宗. 陕西长安南礼王村出土壁画的微生物类群鉴定[J]. 文物保护与考古科学, 1997, 9(1): 39-43.
- [25] 赵凤燕, 严淑梅, 李华. 西安曲江翠竹园西汉壁画霉菌菌分析研究[J]. 文博, 2010, (5): 82-84.
- [26] 葛琴雅, 李哲敏, 孙延忠, 等. 壁画菌害主要种群之分子生物学技术检测[J]. 文物保护与考古科学, 2012, 24(2): 14-21.
- [27] 武发思, 汪万福, 贺东鹏, 等. 嘉峪关魏晋墓腐蚀壁画细菌类群的分子生物学检测[J]. 敦煌研究, 2011, (6): 51-58.
- [28] 马艺蓉, 肖娅萍, 李玉虎, 等. 唐韩休墓考古发掘现场霉菌污染物的采集与鉴定[J]. 中原文物, 2017, (6): 117-124.
- [29] 武发思, 武光文, 刘岩, 等. 太原北齐徐显秀墓壁画真菌群落组成与菌害成因[J]. 微生物学通报, 2016, 43(3): 479-487.
- [30] Tian T, Wu F, Ma Y, et al. Description of *Naumannella cuiyingiana* sp. nov. isolated from a ca. 1500-year-old mural painting, and emended description of the genus *Naumannella* [J]. International Journal of Systematic & Evolutionary Microbiology, 2017, 67(8): 2609.
- [31] 马文霞, 武发思, 田恬, 等. 墓室酥碱砖壁画及其环境的真菌多样性分析[J]. 微生物学通报, 2018, 45(10): 2091-2104.
- [32] 张艳杰, 陈庚龄, 俄军, 等. 甘肃会宁丁沟康湾墓画像砖真菌鉴定与组成分析[J]. 丝绸之路, 2016, (10): 75-76.
- [33] Duan Y, Wu F, Wang W, et al. Differences of microbial community on the wall paintings preserved *in situ* and *ex situ* of the Tiantishan Grottoes, China [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018, 132: 102-113.
- [34] 张景林. 敦煌壁画霉菌病害的防治研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2012.
- [35] 汪万福, 武光文, 赵林毅, 等. 北齐徐显秀墓壁画保护修复研究[M]. 北京: 文物出版社, 2016.
- [36] 王春, 于小玲. 博物馆藏品害虫的综合防治[J]. 四川文物, 2003, (1): 91-93.
- [37] 汪万福, 蔺创业, 王涛, 等. 仿爱夜蛾成虫排泄物对敦煌石窟壁画的损害及其治理[J]. 昆虫学报, 2005, 48(1): 74-81.
- [38] 马淑琴. 文物霉害和虫害的防治[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [39] 韩彤彤, 葛琴雅, 成倩. 白蚁对古代建筑的危害及防治方法研究现状[J]. 文物保护与考古科学, 2014, 26(3): 110-116.
- [40] 柴长宏, 汤春梅. 麦积山石窟及周边环境有害生物调查及防治对策[J]. 林业科技通讯, 2015, (4): 32-36.
- [41] 田敬伊. 馆藏文物常见害虫及综合防治[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2017, 33(5): 55-58.

- [42] 汪万福, 马赞峰, 蔺创业, 等. 昆虫对石窟壁画的危害与防治研究 [J]. 敦煌研究, 2002, (4): 84-91.
- [43] 汪万福, 蔺创业, 张国彬, 等. 甘肃境内石窟寺中壁画有害生物调查及防治对策 [J]. 敦煌研究, 2009, (6): 30-35.
- [44] 汪万福, 武发思, 张国彬, 等. 仿爱夜蛾成虫对敦煌莫高窟模拟壁画的选择趋性 [J]. 昆虫学报, 2013, 56 (10): 1181-1188.
- [45] 汪万福, 吉爱红, 武发思, 等. 仿爱夜蛾成虫在莫高窟模拟壁画表面的运动行为及其损害机理 [J]. 昆虫学报, 2014, 57 (6): 703-709.
- [46] Wang W F, Wu F S, Ji A H, et al. Advancement and prospect of bionic techniques in the conservation of the cultural heritage [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 461 (19): 469-475.
- [47] Ji A H, Wang W F, Yan J F, et al. Locomotive and adhesive behavior of *Apopestes spectrum* on murals in Mogao Grottoes, Dunhuang [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 461 (19): 235-240.
- [48] 吉爱红, 汪万福, 闫俊峰, 等. 仿爱夜蛾在敦煌莫高窟模拟壁画表面的附着力研究 [J]. 敦煌研究, 2015, (1): 111-115.
- [49] 刘俭. 辽宁义县奉国寺殿宇驱除蝙蝠纪实 [J]. 中国文物科学研究, 2010, (4): 43-46.
- [50] 武发思, 汪万福, 贺东鹏, 等. 河北曲阳北岳庙动物病害调查与防治对策研究 [J]. 文物保护与考古科学, 2013, 25 (4): 82-88.
- [51] 汪万福, 武发思, 陈拓, 等. 遗产地植物与遗产保护间关系研究进展 [J]. 敦煌研究, 2011, (6): 101-108.
- [52] 贺东鹏, 武发思, 徐瑞红, 等. 探地雷达在莫高窟窟区树木根系探测方面的应用 [J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29 (2): 86-91.
- [53] Wu F, Wang W, Feng H, et al. Realization of biodeterioration to cultural heritage protection in China [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017, 117: 128-130.